时空干扰效应：基于贝叶斯模型的解释

余 婕 陈有国（通讯作者，cyg1001@swu.edu.cn）

(西南大学心理学部, 重庆 400715)

摘要 时空干扰效应是指时间知觉受空间信息干扰或空间知觉受时间信息干扰而出现错觉的现象。部分研究认为时空干扰是不对称的，空间对时间的干扰总是更大；还有研究认为时间和空间相互干扰的强度受实验因素影响，一般来说，空间对时间的干扰更大，但时间也能对空间产生同等程度甚至更大的干扰。在回顾隐喻理论和量值理论的主要观点之后，重点分析贝叶斯模型对时空干扰效应的解释，最后提出未来研究应关注的三个问题，即拓展贝叶斯模型对时空干扰效应的解释范围，探明基于贝叶斯推断的时空干扰神经机制和探索时空干扰的调控方法。

关键词 时空干扰效应，贝叶斯模型，量值理论，隐喻理论

1 前言

球类运动的竞技场上，找准时机在合适的位置击中球是得分的关键。时间和空间在人类的运动乃至生活的方方面面中都有着密切的联系(Cona et al., 2021)，并且能相互产生影响(Cai et al., 2018)。Kappa 效应(Cohen et al., 1953)和 Tau 效应(Helson, 1930)是两种广泛存在的时空干扰现象。前者指时间知觉[1]受到空间信息干扰，后者指空间知觉受到时间信息干扰。在两种效应的经典研究中，水平放置的灯泡依次亮起，知觉到灯泡点亮的时间间隔（或称为时距）随着灯泡间的距离增大而增大，即 Kappa 效应；知觉到灯泡间的距离随着灯泡点亮的时间间隔增大而增大，即 Tau 效应。类似的时空干扰效应在后续的研究中被发现，比如知觉到的时间随着呈现直线的长度(Magnani et al., 2014; Starr & Brannon, 2016)、圆盘或方块的面积(Rammsayer & Verner, 2014, 2015)增加而增加，知觉到的距离随着直线的呈现时长(Homma & Ashida, 2019)、纯音的持续时长(Kranjec et al., 2019)、触击皮肤上两点的时间间隔(Goldreich, 2007; Goldreich & Tong, 2013) 增加而增加。

虽然国内外已有一些综述对相关研究做过介绍(Choy & Cheung, 2017; Loeffler et al., 2018; Winter et al., 2015; 毕翠华, 黄希庭, 2011; 陈亚林, 刘昌, 2013)，但他们都是从隐喻理论(Boroditsky, 2000)和量值理论(Walsh, 2003)的角度对时空干扰效应的产生机制进行解释。近

[1] 时间知觉主要包括了时距知觉和时序知觉，其中时距是指对事件之间或事件持续的时间长度，时序是指时间的序列特征。在本文介绍的时空干扰效应研究中，时间知觉只与时距知觉有关而与时序知觉无关。

年来研究者将贝叶斯模型应用于时空干扰效应领域(Cai et al., 2018; Chen et al., 2021; Chen et al., 2016; Goldreich, 2007; Goldreich & Tong, 2013; Lambrechts et al., 2013; Martin et al., 2017)，却还未见文章对这些研究做过系统性综述，因此总结和讨论贝叶斯观点对时空干扰效应的解释就显得十分必要。本文首先梳理了近年来与时空干扰效应相关的研究，接着对隐喻理论和量值理论的主要观点进行回顾，随后介绍了贝叶斯模型为时空干扰效应提供的新解释，最后就三种理论的关系和今后研究要关注的问题进行了分析与展望，为未来揭示时空干扰的认知与神经机制奠定基础。

2 时空干扰效应研究

很多研究认为时空干扰是不对称[1]的，空间信息能对时间知觉产生干扰，而时间信息不能对空间知觉产生干扰或干扰程度很小。例如，Casasanto 和 Boroditsky(2008)设计了六个时空干扰实验，分别以逐渐变长的直线（实验一至四）、静止直线（实验六）的长度、圆点移动的距离（实验五）作为空间距离信息，以直线或圆点呈现的时长（实验一至六）、伴随视觉刺激同步呈现的音频的时长（实验四）作为时间时距信息，发现在所有实验中当直线或圆点呈现的时长固定时，被试知觉到的时距随着距离增大而增大，但反过来知觉到的距离不会受到时距变化的影响，这表明空间对时间的干扰更强。随后 Casasanto 及同事(Bottini & Casasanto, 2013; Casasanto et al., 2010)分别以影片中两只卡通蜗牛平行移动的时长和距离作为时间和空间信息，参与实验的儿童需随机比较两只蜗牛中哪一只移动时长或距离更长。研究发现当两只蜗牛移动的时长相同时，儿童倾向于认为移动更长距离的蜗牛移动的时长也更长，但当两只蜗牛移动的距离相同时，儿童对移动距离的判断受移动时长的影响很小，统计分析的结果显示空间对时间的干扰大于时间对空间的干扰。后来，研究者分别采用逐渐增长或静止直线的长度(Magnani et al., 2014; Merritt et al., 2010; Starr & Brannon, 2016)、水平相继闪现的圆点构成的距离(Reali et al., 2019)作为空间信息，都得到了距离越长则知觉到的时距也越长，而时间信息对知觉到的距离无影响或影响很小的结果。

另一些研究发现时间也能对空间产生同等甚至更大程度的干扰。例如，Riemer 等人(2018) 在仿真的虚拟环境中对时空干扰进行探究，发现若采用逐渐增长曲线的长度和呈现时长分别作为空间和时间信息，时空信息都来源于曲线的增长运动，曲线长度越长被试知

[1] “不对称（asymmetry）”与“对称（symmetry）”在数学、物理学、心理学等学科各自具有特定的数理语义。在心理学的时空干扰效应领域研究中，“不对称”被广泛用于描述时间和空间中一个维度对另一个维度产生了更大干扰的现象，而“对称”则常被用于描述空间和时间存在同等程度的双向干扰现象。

觉到的时长越长，空间对时间干扰更大；若采用呈现虚拟房间尺寸大小和房间呈现时长分别作为空间和时间信息，时空信息的来源独立，房间越大被试知觉到的时长越长，且房间呈现的时长越长被试知觉到的房间尺寸越大，时空干扰程度相当。在这项研究中，不同的时空信息来源是时空双向干扰强度的重要影响因素。Homma 和 Ashida(2015, 2019)采用变化的直线长度和呈现时长分别作为空间和时间信息，发现当直线呈现时长的各水平间差异小于直线长度的各水平间差异时，时间刺激显著性（能辨认程度）低，直线长度越长被试知觉到的时间越长，空间对时间产生更强干扰(Homma & Ashida, 2015)，而在缩小直线长度各水平间的差异使空间刺激更难辨认时，直线呈现时长对知觉到的长度产生了更强干扰(Homma & Ashida, 2019)。由此可见，刺激显著性低的维度更容易受到刺激显著性高的维度的影响。此外，有研究发现通过不同的感觉通道呈现刺激会影响时空知觉的敏锐度。空间知觉敏锐度在通过视觉获取信息时最高、在通过听觉或触觉获取信息时较低，而时间知觉敏锐度在通过听觉获取信息时较高、在通过视觉获取信息时较低(Amadeo et al., 2019; Cai & Connell, 2015)。Loeffler 等人(2018)综述了时空干扰效应相关的 16 个研究后提出，得到空间对时间干扰更强的研究多是采用视觉获取空间和时间信息，而得到时空干扰对称的研究多是采用听觉获取时间信息、采用视觉或触觉获取空间信息，知觉敏锐度高的维度能对另一维度产生更大的干扰(Cai & Connell, 2015; Cai et al., 2018)。综上，时间和空间双向干扰的强度会受实验任务中某些因素的调节，如时空信息来源、刺激显著性及知觉敏锐度等。

总之，关于时空干扰效应的方向和强度尚有争议。从相关研究来看，同时存在空间对时间的干扰程度更大、时间对空间的干扰程度更大及时间和空间同等程度相互干扰的现象，需要合理的理论对此现象及时空干扰效应的产生机制进行解释。

3 隐喻理论和量值理论对时空干扰效应的解释

3.1 隐喻理论

隐喻理论(Metaphor Theory)从抽象和具象的关系来解释时空干扰效应。隐喻理论(Boroditsky, 2000)提出人们可以通过视觉等感官直接获取空间信息而不能直接获取时间信息，时间相对空间更加抽象，在生活中人们有使用具象的空间信息来对抽象的时间信息进行隐喻的倾向，例如：三月在四月前面，一个长假等。在语言当中时空干扰的不对称现象是广泛存在的，用空间隐喻时间比用时间隐喻空间要常见得多(Loeffler et al., 2018)。隐喻理论的支持者认为人们通过空间来思考时间，使得语言中时空干扰不对称的关系拓展到了感知觉

领域，由此产生了不对称的时空干扰效应(Casasanto & Boroditsky, 2008)，而动物不会使用语言，也不会用空间隐喻来思考时间，因此动物的时空干扰效应是对称的(Merritt et al., 2010; 毕翠华, 黄希庭, 2011)。

最新的研究并不完全支持隐喻理论。隐喻理论可以解释空间对时间产生不对称干扰的现象，然而多项以人类为被试的研究发现了时间对空间的干扰更强的现象(Cai & Connell, 2015; Homma & Ashida, 2019; Kranjec et al., 2019)，这与主张空间对时间的干扰总是更强的隐喻理论不相符(Cai et al., 2018)。

3.2 量值理论

量值理论(A Theory of Magnitude，ATOM)从量值表征的角度来解释时空干扰效应。由 Walsh 提出的量值理论(Walsh, 2003) 主张时间、空间（和数量）信息是在一个共同的量值系统当中进行处理。脑成像(Cona et al., 2021; Skagerlund et al., 2016)、脑电(Cui et al., 2022)、经颅磁刺激(Riemer et al., 2016)研究揭示参与时间和空间信息处理的脑区存在部分重叠（尤其在顶叶皮层），为量值系统提供了神经生物学证据。在量值系统中，时间和空间信息具有统一的量值表征，个体对某一维度信息的加工会影响对另一维度信息的加工，由此产生了时空干扰效应。尽管不少研究者认为量值理论预测了对称的时空干扰效应(Bottini & Casasanto, 2013; Casasanto et al., 2010; Loeffler et al., 2018; Merritt et al., 2010; 陈亚林, 刘昌, 2013)，但 Walsh 及同事认为量值系统中维度间的相互干扰不一定是对称的(Bueti & Walsh, 2009; Lambrechts et al., 2013)，他们回顾了与时间和空间加工相关的 fMRI 研究结果，发现不同的时间或空间任务激活的大脑皮层位点并不相同，意味着参与不同时间或空间任务的脑组织存在差异，时空干扰的强度可能受到了实验任务的影响(Bueti & Walsh, 2009)。

研究者从贝叶斯推断的观点进一步发展了量值理论。在共同的量值系统中，时间和空间的量值整合和估计在贝叶斯推断的基础上实现(Lambrechts et al., 2013; Martin et al., 2017)，具体内容在下一部分介绍。

4 贝叶斯理论对时空干扰效应的解释

4.1 时空知觉的贝叶斯模型

贝叶斯推断(Bayesian inference)描述了个体如何将已知信息（先验，prior）与新信息（似然性，likelihood）相结合从而做出最优的决策（后验，posterior）。以时间知觉为例，对于给定的时距，先验指个体在先前经历中关于时距长度的知识经验，似然性指当时距信息通过感官输入大脑产生的时距概率分布，可视为时距的感觉记忆表征(Chen et al., 2016)，

后验是指个体整合先验和似然性后形成的有关时距信息的概率分布，知觉到的时距长度为个体对后验的优化估计。Körding 和 Wolpert(2006)提出中枢神经系统在接收感官和运动系统传来的信号时伴随着噪音，整合了先验知识和似然性的贝叶斯推断可能是人类感知觉加工过程的一个基本元素。近年来，研究者将贝叶斯推断理论运用到时空干扰效应领域，对该领域的经典模型进行重新解释与发展。

4.1.1 恒定速度贝叶斯模型

恒定速度模型是基于恒定速度假设提出的。恒定速度假设在时间知觉领域得到了不少研究的支持(Collyer, 1976; Henry & McAuley, 2013; Huang & Jones, 1982)，是指生活中大多数运动的物体都是以一定的速度进行匀速运动。基于此生活经验，观察者将 Kappa 效应和 Tau 效应中在不同空间位置上间隔时间出现的独立刺激，视为以恒定速度运动的同一物体(Chen et al., 2016)。Jones 和 Huang(1982) 据此首次提出了后被称为经典模型或恒定速度模型的代数模型，对 Kappa 效应和 Tau 效应进行了定量的解释。在解释 Kappa 效应的恒定速度模型中，个体知觉到的时距 t_e 是物理时距 t_s 与期望时距的加权平均，其中期望时距为实际距离与恒定速度之比，即$\frac{l}{v_0}$。该模型的代数表达式为$t_e = \omega \cdot t_s + (1-\omega) \cdot \frac{l}{v_0}$。由此可知，当物理时距所占的权重 ω 越小时，知觉到的时距对期望时距的依赖越大（受空间距离的影响越大），即 Kappa 效应越强。类似地，在解释 Tau 效应的恒定速度模型中，个体知觉到的距离是物理距离与期望距离的加权平均，期望距离为物理时距与恒定速度之积。当模型中期望距离所占的权重越大时，Tau 效应越强。恒定速度模型定义了个体知觉到的时距（或距离）受物理值和期望值影响的代数形式，却无法说明为什么知觉到的时距（距离）是物理时距（距离）与期望时距（距离）的加权平均值，也无法确定权重的具体大小。

结合恒定速度假设和贝叶斯推断观点，Chen 等人(2016)提出了恒定速度贝叶斯模型。研究中被试需通过按键时长复制知觉到的时距，其心理过程被分为三个阶段：（1）测量：物理时距 t_s经感官输入神经系统得到心理测量时距，即似然性。似然性服从均值为 t_s、方差为σ_m^2的正态分布。（2）估计：对于相继出现的视觉刺激，个体有着它是以恒定速度 v_0 进行运动的期望。在给定移动距离 l 的条件下，期望时距为$\frac{l}{v_0}$。先验服从均值为$\frac{l}{v_0}$、方差为σ_τ^2的正态分布。根据贝叶斯法则将时距似然性与先验整合获得后验。（3）复制：在反应阶段将后验的优化估计时距 t_e 通过按键复制为产生时距 t_p。最优估计的后验分布均值的代数式为$t_e = \frac{\sigma_\tau^2}{\sigma_\tau^2+\sigma_m^2} \cdot t_s + \frac{\sigma_m^2}{\sigma_\tau^2+\sigma_m^2} \cdot \frac{l}{v_0}$(Chen et al., 2016)。将$\frac{\sigma_\tau^2}{\sigma_\tau^2+\sigma_m^2}$定义为权重 ω 后，该代数式与 Jones 和

Huang(1982)构建模型的代数式等价。恒定速度贝叶斯模型用贝叶斯最优估计的原理说明了为什么知觉到的时距（后验）是物理时距（似然性）和期望时距（先验）的加权平均，并给出了权重的计算式。

4.1.2 慢速度贝叶斯模型

慢速度贝叶斯模型是基于慢速度假设提出的。慢速度假设在速度知觉领域得到了很多研究的支持(Freeman et al., 2010; Stocker & Simoncelli, 2006; Weiss et al., 2002)，是指个体倾向于认为生活中的大多数物体是静止或处于很慢速度的运动当中。基于此倾向，观察者产生了一个慢速度的预期，认为 Kappa 效应和 Tau 效应研究中不同位置相继出现的独立刺激是以慢速度运动的同一刺激。Goldreich(2007)根据该假设提出了慢速度贝叶斯模型，对触觉 Kappa 效应和 Tau 效应进行了定量解释。以触觉 Kappa 效应的慢速度贝叶斯模型为例，假定大脑对于皮肤上两次触觉刺激的空间位置 x 所形成的神经信号 D 都服从正态分布（空间似然性），函数表达式分别为$p(D \mid x) \propto \frac{1}{\sigma_s} e^{-\frac{(x-x_1)^2}{2\sigma_s^2}}$和$p(D \mid x, v, \tau) \propto \frac{1}{\sigma_s} e^{-\frac{(x+v\tau-x_2)^2}{2\sigma_s^2}}$，其中 x_1 和 x_2 分别为第一次和第二次触击皮肤的位置，σ_s 为代表空间信息不确定性的标准差，v 和 τ 分别为两次触击位置之间刺激“运动”的速度和时距；同样，大脑对于两次触觉刺激出现的时间点 t 所形成的神经信号 D 也都服从正态分布（时间似然性），函数表达式分别为$p(D \mid t) \propto \frac{1}{\sigma_t} e^{-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}}$和$p(D \mid t, \tau) \propto \frac{1}{\sigma_t} e^{-\frac{(t+\tau-t_s)^2}{2\sigma_t^2}}$，其中第一次触觉刺激出现的时间点被定义为 0，$t_s$ 为第二次触觉刺激出现的时间点，σ_t 为代表时间信息不确定性的标准差。两次触觉刺激形成了一个刺激在皮肤上连续运动的错觉，“运动”期间大脑联合神经信号（时空联合似然性）的概率分布是空间似然性分布与时间似然性分布之积，即$p(D \mid x, v, t, \tau) \propto \frac{1}{\sigma_s^2 \sigma_t^2} e^{-\left[\frac{(x-x_1)^2+(x+v\tau-x_2)^2}{2\sigma_s^2}+\frac{t^2+(t+\tau-t_S)^2}{2\sigma_t^2}\right]}$。同时观察者有着触觉刺激是以慢速度“运动”从而“到达”不同皮肤位置的期望，速度服从均值为 0、标准差为σ_v的正态分布（先验），函数表达式为$p(x, v, t, \tau) \propto \frac{1}{\sigma_v} e^{-\frac{v^2}{2\sigma_v^2}}$。Goldreich 及其同事由此提出的触觉 Kappa 效应慢速度贝叶斯模型，将慢速度的先验分布与时空联合似然性分布相整合，根据贝叶斯法则推导出后验分布的函数表达式$p(x, v, t, \tau \mid D) \propto \frac{1}{\sigma_s^2 \sigma_t^2 \sigma_v} e^{-\left[\frac{(x-x_1)^2+(x+v\tau-x_2)^2}{2\sigma_s^2}+\frac{t^2+(t+\tau-t_s)^2}{2\sigma_t^2}+\frac{v^2}{2\sigma_v^2}\right]}$，用于计算估计时间的量值大小(Goldreich, 2007; Goldreich & Tong, 2013)。

4.1.3 对数版恒定速度贝叶斯模型

恒定速度贝叶斯模型与慢速度贝叶斯模型都有待完善。Chen 等人(2016)采用这两个模

型来拟合被试的行为数据，二者都能较好地预测出被试知觉到的时间随着距离增大而增大的趋势，采用 AIC 值(Akaike information criterion)评估两个模型的数据拟合度 (Akaike, 1974)，结果显示同时考虑了时间与空间信息不确定性的慢速度模型拟合数据的能力更好。数据拟合结果还显示，恒定速度贝叶斯模型计算得到的恒定速度约为 0.2°/s。以往研究发现老年人的绝对速度阈限约为 0.12°/s，青年人的绝对速度阈限约为 0.09°/s (Snowden & Kavanagh, 2006)。恒定速度与绝对速度阈限值接近，恒定速度实际上也是慢速度(Chen et al., 2016)。然而，慢速度模型的函数表达式太过复杂，并且模型中的空间信息不确定性是从以往的研究中推测得来，难以普遍地适用于不同的被试与实验条件。相比之下，恒定速度模型的函数表达式简洁易懂，虽然拟合数据的能力没有慢速度模型好，但若能提升恒定速度模型的数据拟合度，将会成为更有潜力的模型。

最近 Chen 等人(2021)结合韦伯-费希纳定律(Weber-Fechner law)提出了对数版恒定速度贝叶斯模型。前文提到的恒定速度(Chen et al., 2016)和慢速度(Goldreich, 2007; Goldreich & Tong, 2013)贝叶斯模型都是采用线性关系建立代表时间或空间心理量值的似然性函数。在心理物理法中，韦伯-费希纳定律认为物理量值由感官系统登入大脑后是以对数形式转化为心理量值的(Petzschner et al., 2015)，这种对数转化关系在距离复制(Lakshminarasimhan et al., 2018)、时距估计(de Jong et al., 2021)、数量加工(Dehaene et al., 2008)等多项研究中得到证实。Chen 等人(2016)发现被试在估计相继闪现的小圆所构成的时距时，距离对时距知觉影响的效应强度（Kappa 效应强度）随着距离的增大呈现增速减缓的趋势。随后 Chen 等人(2021)在原版恒定速度贝叶斯模型(Chen et al., 2016)的基础上提出对数版恒定速度贝叶斯模型，假设物理时距 t_s 和期望时距$\frac{l}{v_0}$遵循韦伯-费希纳定律以对数形式进行心理表征，形成的心理测量时距 S_m（似然性）和心理期望时距 S_τ（先验）都服从对数正态分布（Lognormal distribution），前者的函数表达式为$p(S_m \mid S_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{sm}} e^{-\frac{(S_m - S_s)^2}{2\sigma_{sm}^2}}$，均值为$S_s = \ln\left(1 + \frac{t_s}{t_0}\right)$、标准差为 σ_{sm}；后者的函数表达式为$p(S_\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{s\tau}} e^{\frac{(S_\tau - S_0)^2}{2\sigma_{s\tau}^2}}$，均值为$S_0 = \ln\left(1 + \frac{l}{v_0 t_0}\right)$、标准差为 $\sigma_{s\tau}$。根据贝叶斯法则得到最优估计的后验分布均值的代数式为$S_e = \frac{\sigma_{s\tau}^2}{\sigma_{s\tau}^2 + \sigma_{sm}^2} S_m + \frac{\sigma_{sm}^2}{\sigma_{s\tau}^2 + \sigma_{sm}^2} S_0$(Chen et al., 2021)。对被试行为数据的模型拟合度通过 AIC 值进行评估，结果显示数版恒定速度贝叶斯模型的拟合能力优于原版恒定速度贝叶斯模型，且前者能预测出 Kappa 效应随小圆间距离的增加而出现的增速减缓趋势。

4.1.4 其他贝叶斯模型

量值理论的支持者在原有理论的基础上提出解释时空干扰效应的贝叶斯模型。量值理论(Walsh, 2003)主张时间和空间信息登入大脑后，经由统一的量值系统转化为具有相同度量标准的“心理量值”，在顶叶进行加工处理(Bueti & Walsh, 2009)。随后研究者(Lambrechts et al., 2013; Martin et al., 2017)将量值理论整合到贝叶斯推断的框架之中。假设对时间、空间（及数量等）中某一目标维度量值的估计会受到其他非目标维度量值的影响，表现为增加（减少）非目标维度的量值会增加（减少）对目标维度的量值估计，个体根据贝叶斯法则将先验假设与感觉输入信息（似然性）整合后形成目标维度知觉到的量值（后验）。然而，研究者基于量值理论只提出了贝叶斯模型的理论构想，没有形成具体的函数表达式，还需要进一步的研究验证模型的解释力。

有研究者提出了解释时空干扰效应的维度共变贝叶斯模型。Cai 等人(2018)假定时间和空间两个维度各自具有独立的先验分布和似然性分布。两个维度的先验当中时间和空间大小都存在共变的关系，即一个维度的值越大，个体倾向于认为另一个维度的值也更大（如：去更远的距离需要花费更长的时间）。Cai 等人(2018)将时间和空间的分布信息整合形成了维度共变贝叶斯模型，根据贝叶斯法则推导出后验分布均值的函数计算式为$m_t = \frac{\Sigma_t}{\Sigma_t+\Sigma_\theta}x + \frac{\Sigma_\theta}{\Sigma_t+\Sigma_\theta}\mu_t$，其中 x=(x_1, x_2)的两个取值分别代表时间和空间信息在工作记忆中形成的有噪信号（似然性），服从均值向量为 θ=(θ_1, θ_2)、协方差矩阵为$\Sigma_\theta = \begin{bmatrix}\sigma^2 & 0 \\ 0 & a\sigma^2\end{bmatrix}$的多元正态分布；$\mu_t$代表时间和空间信息的先验分布，为了简化模型，假定其服从均值向量为(0, 0)、协方差矩阵为$\Sigma_t = \begin{bmatrix}1 & \rho \\ \rho & 1\end{bmatrix}$的多元正态分布。然而，研究者没有对被试的行为数据进行模型拟合，模型的解释力尚未得到数据层面的支持。

4.2 时空干扰效应的贝叶斯解释

研究者基于不同的假设构建贝叶斯模型对时空干扰效应的产生机制进行了解释。在最基础的贝叶斯模型中，后验分布的均值是似然性分布均值与先验分布均值的加权平均(Körding & Wolpert, 2006)，二者所占权重的代数式分别为$\frac{\sigma_\tau^2}{\sigma_\tau^2+\sigma_m^2}$和$\frac{\sigma_m^2}{\sigma_\tau^2+\sigma_m^2}$，当似然性分布的方差$\sigma_m^2$比先验分布的方差$\sigma_\tau^2$大时，后验分布的均值将更依赖于先验分布的均值(Petzschner et al., 2015)。贝叶斯模型被用于触觉和视觉的时空干扰效应研究，表 1 对这些研究中时空信息的形式、贝叶斯模型三要素的内容（先验、似然性、后验），以及对时空干扰效应的解释等进行了具体介绍。在各个贝叶斯模型的先验假设里，时间与空间分别以慢速度(Goldreich, 2007; Goldreich & Tong, 2013)、恒定速度(Chen et al., 2021; Chen et al., 2016)或一定的共变关

系(Cai et al., 2018; Lambrechts et al., 2013; Martin et al., 2017)相联，表现出越长（越短）的距离与越长（越短）的时距相互对应。当感觉登入时距或距离的心理量值表征不确定性越大，即神经信号的噪声越大（似然性分布的变异越大），个体将更依赖于知识经验（先验假设）对时距或距离进行最优估计（后验推断），使知觉到的时距或距离受到先验里另一个维度信息的干扰，产生时空干扰效应。

贝叶斯模型的观点认为，时空干扰效应中双向的干扰强度不是固定不变的。在过往的时空干扰研究中，若通过减小时间刺激各水平间的差异降低时间刺激的显著性(Homma & Ashida, 2015)，或通过改变刺激呈现的感觉通道降低时间知觉的敏锐度（例如，视觉通道时间知觉的敏锐度低于听觉通道）(Cai & Connell, 2015; Loeffler et al., 2018)，会使时间信息通过感觉输入大脑的神经信号噪声增加，个体将更多地依赖先验中的空间信息进行决策，空间信息对时间知觉的干扰效应就越强；类似地，若通过减小空间刺激各水平间的差异降低空间刺激的显著性(Homma & Ashida, 2019)，或通过改变刺激呈现的感觉通道(Cai & Connell, 2015; Loeffler et al., 2018)、皮肤位置(Goldreich, 2007; Goldreich & Tong, 2013)降低空间知觉的敏锐度，会使空间信息通过感觉输入大脑的神经信号噪声增加，个体将更多地依赖先验中的时间信息进行决策，时间信息对空间知觉的干扰效应就越强。此外，Cai 等人(2018)通过构建维度共变贝叶斯模型后提出，时空干扰效应的（不）对称性受到时间和空间信息在工作记忆中的相对噪声大小（即时间和空间的似然性分布的相对方差大小）的影响，若二者大小相当，表现出时空之间的对称干扰；若二者大小不同，表现出记忆噪声较小（似然性分布方差较小）的维度对另一维度产生更强的不对称干扰(Cai & Wang, 2022)。因此，时空干扰效应并不一定是对称或不对称的，其对称性会受时间和空间的刺激显著性、知觉敏锐度等实验因素的影响。总之，在过往研究中同时存在空间对时间干扰程度更大、时间对空间干扰程度相当甚至更大的现象，采用贝叶斯模型的观点能够进行较为完善的解释。

表 1 基于贝叶斯模型的时空干扰效应研究

研究	贝叶斯模型及解释范围	时空信息及感觉通道	先验	似然性	后验	解释时空干扰效应
Goldreich, 2007; Goldreich & Tong, 2013	慢速度贝叶斯模型；用于解释时空干扰效应中的触觉 Tau 效应和 Kappa 效应	空间：触觉；皮肤上两次刺激间的距离 时间：触觉；皮肤上两次刺激间的时距	慢速度先验：均值为 0，标准差为 σ_v 的高斯分布	通过触觉登入的两次刺激位置间距离的神经信号，以及两次触击时间点的神经信号整合在一起形成的时空联合似然性分布	慢速度先验与触觉神经信号的整合	在慢速度先验概率分布不变的前提下，刺激皮肤位置的空间知觉精确度越低（如前臂），神经信号的变异性越大，知觉到的距离（时距）越依赖于慢速度先验，表现出 Tau 效应（Kappa 效应）越强。
Chen et al., 2016	恒定速度贝叶斯模型；用于解释时空干扰效应中的视觉 Kappa 效应	空间：视觉；相继呈现的小圆构成的距离 时间：视觉；相继呈现的小圆构成的时距	期望时距的概率分布，小圆以恒定速度从第一个位置移向第二个位置，期望时距的均值为两个小圆的距离与恒定速度之商	物理时距通过感觉加工后线性转化为心理时距的概率分布	期望时距的概率分布与时距似然性的整合	知觉到的时距受先验中期望时距（距离与速度之商）的影响，随着两个小圆间距离的增大而增大；
Chen et al., 2021	对数版恒定速度贝叶斯模型；用于解释时空干扰效应中的视觉 Kappa 效应			物理时距通过韦伯-费希纳定律按照对数尺度转化为心理时距的概率分布		对数版恒定速度贝叶斯模型拟合被试数据的能力比恒定速度贝叶斯模型好，且能预测 Kappa 效应随间隔距离逐渐增大而出现增速减缓的现象。
Lambrechts et al., 2013; Martin et al., 2017	基于量值理论的贝叶斯模型；理论上能用于解释普遍范围的时空干扰效应	空间：视觉；平面上逐步呈现大小不一的圆累计构成的面积 时间：视觉；呈现第一个圆到最后一个圆构成的时距	假设对时间、空间等量值的估计会受其他维度量值的影响（如：对时间量值的估计会随空间量值的增加而增加）	时间、空间等量值信息输入大脑后储存在顶叶的神经表征	先验分布和时间、空间的量值的神经表征的整合	时间或空间的量值信息输入大脑后的表征噪声越大（似然性分布变异性越大），知觉到的量值将越依赖于先验分布，出现越大的估计偏差。
Cai et al., 2018	维度共变贝叶斯模型；理论上能用于解释普遍范围的时空干扰效应	空间：视觉；直线的长度或两根竖线构成的距离 时间：视觉；直线或竖线呈现的时长	假设时空之间存在正向共变的先验关系（如：更长的距离通常需要更长的时间到达）	时间和空间信息的工作记忆表征	共变先验分布与时间、空间信息的工作记忆表征的整合	跨维度干扰的程度和方向取决于各个维度在工作记忆中的相对噪声大小，记忆噪声小的维度能对另一维度产生更强的干扰。

5 总结与展望

隐喻理论、量值理论、贝叶斯模型三者并非是相互排斥的，而是从不同的角度对时空干扰效应进行解释。隐喻理论从语言使用的角度出发，认为人们常用空间来隐喻时间的习惯拓展到了感知觉领域，使空间对时间产生不对称干扰(Boroditsky, 2000)。量值理论从神经机制的角度出发，主张时间和空间信息在顶叶皮质的共同量值系统中进行加工，能产生双向的干扰效应(Walsh, 2003)。贝叶斯模型从模型预测行为的角度出发，认为人类的知觉过程符合贝叶斯推断原理，即感觉输入信息（似然性）具有不确定性，结合经验信息（先验）能做出最优决策（后验），因而对某一维度信息的知觉会受到先验里另一维度信息的干扰(Chen et al., 2021; Goldreich, 2007)。此外，三种理论对时间和空间关系的假设存在共通之处。隐喻理论假设空间距离越长（短）则个体倾向于认为相应的时间时距也越长（短）(Casasanto & Boroditsky, 2008)；量值理论假设生活中各个量值间存在单调的映射关系（monotonic “more A-more B” mapping），一个维度量值的增加（减少）对应着另一个维度的量值的增加（减少）(Bueti & Walsh, 2009)；时空知觉的贝叶斯模型则假定，先验里更长（短）的距离需要更长（短）的时间到达(Cai et al., 2018; Martin et al., 2017; Petzschner et al., 2015)。三种理论都认为知觉到的时间和空间的大小存在着一定的同向对应关系，这提示我们可以将时空关系在量值理论和隐喻理论中的合理观点吸收到贝叶斯模型的先验假设内，在未来通过对先验假设进行完善，探明其神经基础，构建出更合理的模型。具体而言，对于时空干扰领域的贝叶斯模型研究，还有以下三个问题需要关注。

第一，贝叶斯模型对时空干扰效应的解释范围有待扩展。量值理论在神经机制层面得到了验证(Bueti & Walsh, 2009)，但研究者基于量值理论提出的贝叶斯模型(Lambrechts et al., 2013; Martin et al., 2017)只描述了模型的构想，没有具体的函数表达式。维度共变贝叶斯模型(Cai et al., 2018)没有限定时间和空间信息的具体形式，模型的解释范围更全，却没有进行数据层面的验证。相比之下，基于恒定速度(Chen et al., 2021; Chen et al., 2016)和慢速度(Goldreich, 2007; Goldreich & Tong, 2013)假设提出的贝叶斯模型具有明确的函数表达式，并能较好地拟合被试行为数据，获得了数据层面的支持，因此具有更广的应用前景。但在现有的研究中，恒定速度和慢速度贝叶斯模型尚局限于解释 Kappa 效应和 Tau 效应，模型中的空间和时间信息分别为相继出现的刺激构成的空间间隔和时间间隔。两种模型分别假定，观察者会先验地认为刺激是以恒定速度或慢速度（接近于零的速度）运动到不同的空间位置，速度与“运动时间”之积为“运动距离”。而在更广泛的时空干扰效应研究中，空间和

时间信息可以是直线的长度和呈现时长(Magnani et al., 2014; Merritt et al., 2010; Starr & Brannon, 2016)、圆盘或方块的面积和呈现时长(Rammsayer & Verner, 2014, 2015)等，这些实验刺激都在空间量值上发生了变化，而在空间位置上没有变化，难以直接运用恒定速度或慢速度贝叶斯模型进行解释。一种可能的解决方案是，基于维度共变模型(Cai et al., 2018)和量值理论(Bueti & Walsh, 2009; Lambrechts et al., 2013)的观点，假定时间和空间的量值存在共变或单调映射的关系，即时间越长则直线的长度、圆盘或方块的面积等空间量值的增长程度越大。根据这种思想，原本局限于解释 Kappa 效应和 Tau 效应的贝叶斯模型，将模型先验假设中的速度替换为一定的时空共变系数后，未来或许能被用于解释更广阔范围的时空干扰效应。

第二，基于贝叶斯推断的时空干扰神经机制还需探明。在过去的时空干扰领域的贝叶斯模型研究当中，研究者通过拟合数据，在数据层面获得了模型解释力的证据，但还欠缺神经机制层面的支撑。近年来脑成像技术被运用于贝叶斯推断的神经机制研究当中。一方面，研究者在空间知觉的研究中发现先验和似然性的大脑表征脑区存在分离。Vilares 等人(2012)采用 fMRI 技术记录被试在判断空间位置时的大脑激活状态，发现似然性的表征与早期视觉运动通路的活动有关，而先验的表征则与高级认知区域的活动有关，包括壳核(putamen)、杏仁核(amygdala)、脑岛(insula)和眶额皮质(orbitofrontal cortex)。拓展到时空干扰效应研究领域，未来应结合各种神经科学的技术手段，探索时间信息和空间信息的先验分布与似然性分布的神经表征，及其贝叶斯整合过程的神经网络基础。另一方面，研究者认为脑电的 P3 成分与贝叶斯推断密切相关(Kolossa et al., 2015; Kopp et al., 2016)。最近一项使用 EEG 技术开展的 Kappa 效应研究发现，源于顶叶皮层(parietal cortex)的 P2 和 P3b 成分与空间信息调节时间知觉的贝叶斯整合有关(Cui et al., 2022)。未来可以利用与时空干扰的贝叶斯整合有关的神经指标（如顶叶的 P2、P3b 成分），从神经机制层面对贝叶斯模型的基本假设，如恒定速度假设(Chen et al., 2021; Chen et al., 2016)、慢速度假设(Goldreich, 2007; Goldreich & Tong, 2013)等，做进一步的验证。

第三，时空干扰的调控方法值得进一步探索。贝叶斯推断的观点认为，若时间信息或空间信息的似然性分布的不确定性发生变化，个体在决策时对先验知识中另一维度信息的依赖程度也会发生变化，从而表现出时空干扰强度的变化(Petzschner et al., 2015)。已有研究发现，若通过减小时间或空间刺激各水平间的差异，降低刺激的显著性(Homma & Ashida, 2015, 2019)，或通过改变时间或空间刺激呈现的感觉通道，减弱知觉的敏锐度(Cai & Connell, 2015; Loeffler et al., 2018)，会使感觉输入的时间或空间信息（似然性）的不确定性

增大，更容易受到先验中另一维度信息的干扰。基于贝叶斯理论，在未来的研究中可以通过以下两个角度来调控时空干扰。一方面可以操纵时空信息似然性的不确定性，例如采用时间和空间的知觉训练(Healy et al., 2015)、改变刺激的清晰度(Schroeger et al., 2021)或信噪比(Petzschner et al., 2015)等方式增强或减弱时空干扰的强度；另一方面可以尝试改变被试的先验知识，例如通过启动训练反转被试的经验中时间和空间的同向共变关系，将长距离与短时距相联结，从而改变时空干扰的方向。对时空干扰效应进行有效的调控，其研究成果有望应用于汽车驾驶、航空航天等对时空知觉精度具有高要求的领域，降低相关事故的发生概率。

参考文献

毕翠华, 黄希庭. (2011). 非语言情境中时间加工与空间距离加工的关系. *心理科学进展*, *19*(3), 346–354.

陈亚林, 刘昌. (2013). 人类数字、时间和空间加工的关联性与独立性. *科学通报*, *58*(25), 2622–2630.

Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control, 19*(6), 716–723.

Amadeo, M. B., Campus, C., & Gori, M. (2019). Time attracts auditory space representation during development. *Behavioural Brain Research*, *376*.

Boroditsky, L. (2000). Metaphoric structuring: Understanding time through spatial metaphors. *Cognition*, *75*(1), 1–28.

Bottini, R., & Casasanto, D. (2013). Space and time in the child's mind: Metaphoric or ATOMic? *Frontiers in Psychology*, *4*.

Bueti, D., & Walsh, V. (2009). The parietal cortex and the representation of time, space, number and other magnitudes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, *364*(1525), 1831–1840.

Cai, Z. G., & Connell, L. (2015). Space–time interdependence: Evidence against asymmetric mapping between time and space. *Cognition*, *136*, 268–281.

Cai, Z. G., & Wang, R. (2022). Cross-dimensional magnitude interaction is modulated by representational noise: Evidence from space–time interaction. *Psychological Research*, *86*(1), 196–208.

Cai, Z. G., Wang, R., Shen, M., & Speekenbrink, M. (2018). Cross-dimensional magnitude interactions arise from memory interference. *Cognitive Psychology*, *106*, 21–42.

Casasanto, D., & Boroditsky, L. (2008). Time in the mind: Using space to think about time. *Cognition*, *106*(2), 579–593.

Casasanto, D., Fotakopoulou, O., & Boroditsky, L. (2010). Space and time in the child’s mind: Evidence for a cross-dimensional asymmetry. *Cognitive Science*, *34*(3), 387–405.

Chen, Y., Peng, C., & Avitt, A. (2021). A unifying Bayesian framework accounting for spatiotemporal interferences with a deceleration tendency. *Vision Research*, *187*, 66–74.

Chen, Y., Zhang, B., & Kording, K. P. (2016). Speed constancy or only slowness: What drives the kappa effect. *PloS One*, *11*(4).

Choy, E. E. H., & Cheung, H. (2017). Linguistic asymmetry, egocentric anchoring, and sensory modality as factors for the observed association between time and space perception. *Cognitive Processing*, *18*(4), 479–490.

Cohen, J., Hansel, C. E. M., & Sylvester, J. D. (1953). A new phenomenon in time judgment. *Nature*, *172*(4385), 901–901.

Collyer, C. (1976). The induced asynchrony effect: Its role in visual judgments of temporal order and its relation to other dynamic perceptual phenomena. *Perception & Psychophysics, 19*(1), 47–54.

Cona, G., Wiener, M., & Scarpazza, C. (2021). From ATOM to GradiATOM: Cortical gradients support time and space processing as revealed by a meta-analysis of neuroimaging studies. *Neuroimage*, *224*.

Cui, M., Peng, C., Huang, M., & Chen, Y. (2022). Electrophysiological evidence for a common magnitude representation of spatiotemporal information in working memory. *Cerebral Cortex*, *32*(18), 4068-4079.

de Jong, J., Akyurek, E. G., & van Rijn, H. (2021). A common dynamic prior for time in duration discrimination. *Psychonomic Bulletin & Review*, *28*(4), 1183–1190.

Dehaene, S., Izard, V., Spelke, E., & Pica, P. (2008). Log or linear? Distinct intuitions of the number scale in Western and Amazonian indigene cultures. *Science*, *320*(5880), 1217–1220.

Freeman, T. C. A., Champion, R. A., & Warren, P. A. (2010). A Bayesian model of perceived head-centered velocity during smooth pursuit eye movement. *Current Biology*, *20*(8), 757–762.

Goldreich, D. (2007). A Bayesian perceptual model replicates the cutaneous rabbit and other tactile spatiotemporal illusions. *PloS One*, *2*(3), e333–e333.

Goldreich, D., & Tong, J. (2013). Prediction, postdiction, and perceptual length contraction: A Bayesian low-speed prior captures the cutaneous rabbit and related illusions. *Frontiers in Psychology*, *4*.

Healy, A. F., Tack, L. A., Schneider, V. I., & Barshi, I. (2015). Training specificity and transfer in time and distance estimation. *Memory & Cognition*, *43*(5), 736–747.

Helson, H. (1930). The tau effect—an example of psychological relativity. *Science*, *71*(1847), 536–537.

Henry, M. J., & McAuley, J. D. (2013). Perceptual distortions in pitch and time reveal active prediction and support for an auditory pitch-motion hypothesis. *PloS One, 8*(8), e70646.

Homma, C. T., & Ashida, H. (2015). What makes space-time interactions in human vision asymmetrical? *Frontiers in Psychology*, *6*.

Homma, C. T., & Ashida, H. (2019). Temporal cognition can affect spatial cognition more than vice versa: The effect of task-related stimulus saliency. *Multisensory Research*, *32*(1), 25–44.

Huang, Y. L., & Jones, B. (1982). On the interdependence of temporal and spatial judgments. *Perception & Psychophysics, 32*(1), 7–14.

Jones, B., & Huang, Y. L. (1982). Space-time dependencies in psychophysical judgment of extent and duration: Algebraic models of the tau and kappa effects. *Psychological Bulletin*, *91*(1), 128–142.

Kolossa, A., Kopp, B., & Fingscheidt, T. (2015). A computational analysis of the neural bases of Bayesian inference. *Neuroimage*, *106*, 222–237.

Kopp, B., Seer, C., Lange, F., Kluytmans, A., Kolossa, A., Fingscheidt, T., & Hoijtink, H. (2016). P300 amplitude variations, prior probabilities, and likelihoods: A Bayesian ERP study. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, *16*(5), 911–928.

Körding, K. P., & Wolpert, D. M. (2006). Bayesian decision theory in sensorimotor control. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*(7), 319–326.

Kranjec, A., Lehet, M., Woods, A. J., & Chatterjee, A. (2019). Time is not more abstract than space in sound. *Frontiers in Psychology*, *10*.

Lakshminarasimhan, K. J., Petsalis, M., Park, H., DeAngelis, G. C., Pitkow, X., & Angelaki, D. E. (2018). A dynamic Bayesian observer model reveals origins of bias in visual path integration. *Neuron*, *99*(1), 194–206.e195.

Lambrechts, A., Walsh, V., & van Wassenhove, V. (2013). Evidence accumulation in the magnitude system. *PloS One*, *8*(12).

Loeffler, J., Cañal-Bruland, R., Schroeger, A., Tolentino-Castro, J. W., & Raab, M. (2018). Interrelations between temporal and spatial cognition: The role of modality-specific processing. *Frontiers in Psychology*, *9*.

Magnani, B., Oliveri, M., & Frassinetti, F. (2014). Exploring the reciprocal modulation of time and space in dancers and non-dancers. *Experimental Brain Research*, *232*(10), 3191–3199.

Martin, B., Wiener, M., & Wassenhove, V. v. (2017). A Bayesian perspective on accumulation in the magnitude system. *Scientific Reports*, *7*(1), 630–630.

Merritt, D. J., Casasanto, D., & Brannon, E. M. (2010). Do monkeys think in metaphors? Representations of space and time in monkeys and humans. *Cognition*, *117*(2), 191–202.

Petzschner, F. H., Glasauer, S., & Stephan, K. E. (2015). A Bayesian perspective on magnitude estimation. *Trends in Cognitive Sciences*, *19*(5), 285–293.

Rammsayer, T. H., & Verner, M. (2014). The effect of nontemporal stimulus size on perceived duration as assessed by the method of reproduction. *Journal of Vision*, *14*(5), 17–17.

Rammsayer, T. H., & Verner, M. (2015). Larger visual stimuli are perceived to last longer from time to time: The internal clock is not affected by nontemporal visual stimulus size. *Journal of Vision*, *15*(3), 5–5.

Reali, F., Lleras, M., & Alviar, C. (2019). Asymmetrical time and space interference in Tau and Kappa effects. *Cogent Psychology*, *6*(1), 1568069.

Riemer, M., Diersch, N., Bublatzky, F., & Wolbers, T. (2016). Space, time, and numbers in the right posterior parietal cortex: Differences between response code associations and congruency effects. *Neuroimage*, *129*, 72–79.

Riemer, M., Shine, J. P., & Wolbers, T. (2018). On the (a)symmetry between the perception of time and space in large-scale environments. *Hippocampus*, *28*(8), 539–548.

Schroeger, A., Tolentino-Castro, J. W., Raab, M., & Cañal-Bruland, R. (2021). Effects of visual blur and contrast on spatial and temporal precision in manual interception. *Experimental Brain Research*, *239*(11), 3343–3358.

Skagerlund, K., Karlsson, T., & Traff, U. (2016). Magnitude processing in the brain: An fMRI study of time, space, and numerosity as a shared cortical system. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*.

Snowden, R. J., & Kavanagh, E. (2006). Motion perception in the ageing visual system: Minimum motion, motion coherence, and speed discrimination thresholds. *Perception, 35*(1), 9–24.

Starr, A., & Brannon, E. M. (2016). Visuospatial working memory influences the interaction

between space and time. *Psychonomic Bulletin & Review*, *23*(6), 1839–1845.

Stocker, A. A., & Simoncelli, E. P. (2006). Noise characteristics and prior expectations in human visual speed perception. *Nature Neuroscience, 9*(4), 578–585.

Vilares, I., Howard, J. D., Fernandes, H. L., Gottfried, J. A., & Kording, K. P. (2012). Differential representations of prior and likelihood uncertainty in the human brain. *Current Biology*, *22*(18), 1641–1648.

Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: Common cortical metrics of time space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*(11), 483–488.

Weiss, Y., Simoncelli, E. P., & Adelson, E. H. (2002). Motion illusions as optimal percepts. *Nature Neuroscience, 5*(6), 598–604.

Winter, B., Marghetis, T., & Matlock, T. (2015). Of magnitudes and metaphors: Explaining cognitive interactions between space, time, and number. *Cortex*, *64*, 209–224.

Spatiotemporal interference effect: An explanation based on Bayesian models

YU Jie, CHEN Youguo

(*Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*)

Abstract: The interference of space on time and vice versa are common in daily life. The spatiotemporal interference effect is a phenomenon in which temporal perception is disturbed by spatial information or spatial perception is disturbed by temporal information. Some studies suggest that spatiotemporal interference is asymmetric, and the spatial interference on time is always greater. Other studies indicate that the strength of mutual interference between time and space is influenced by experimental factors. In general, spatial interference on time is greater, but time can also produce the same degree or even greater interference on space. After a brief review of the main ideas of metaphor theory and a theory of magnitude (ATOM), the explanation of spatiotemporal interference effect by Bayesian models is highlighted. Finally, three potential directions should be addressed in further studies: (a) expanding the scope of the Bayesian model to explain the spatiotemporal interference effect, (b) exploring the neural mechanism of spatiotemporal interference based on Bayesian inference, and (c) seeking regulation methods for spatiotemporal interference.

Keywords: spatiotemporal interference, Bayesian model, metaphor theory, a theory of magnitude